

КРАТКИЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.314: 004.94

О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭНДОГЕННОГО ИСТОЧНИКА ПРЕСНЫХ ВОД  
В РИФТОВЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ю.Н. Диденков, В.А. Бычинский\*, И.С. Ломоносов\*

*Иркутский государственный технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия*

*\* Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

Рифтогенный режим развития Байкальского региона predetermined существование трех типов гидрогеологических структур: рифтовые впадины — гидрогеологические бассейны; „плечи“ рифта — гидрогеологические массивы; рифтогенные разрывные тектонические нарушения — обводненные разломы, контрастно различающихся условиями формирования подземных вод. Наиболее крупные скопления формируются в пределах бассейнов и обводненных разломов, причем в зонах дробления приповерхностных разломов локализуются холодные подземные воды атмосферного генезиса, а пресные трещинно-жильные воды глубоких разломов обладают повышенной температурой и специфическим микрокомпонентным и газовым составом. Если глубинное происхождение ряда микрокомпонентов подземных вод благодаря мантийным „меткам“ не вызывает сомнения, то участие эндогенного источника в формировании самого растворителя требует привлечения дополнительных данных.

С помощью метода минимизации термодинамических потенциалов сделана качественная оценка процесса преобразования глубинного углеводородного флюида в геобаротермических условиях рифтовых систем. Результаты моделирования позволяют обосновать существование в рифтовых структурах водно-углекислой ветви глубинной дегазации Земли, а также выявить условия генерации пресных ювенильных вод из восходящего исходно сухого углеводородного мантийного флюида.

*Рифтовые структуры, структурно-гидрогеологический анализ, углеводородный флюид, физико-химическое моделирование.*

THE POSSIBLE EXISTENCE OF AN ENDOGENOUS SOURCE  
OF FRESH WATERS IN RIFT SETTINGS

Yu.N. Didenkov, V.A. Bychinsky, and I.S. Lomonosov

The rifting in the Baikal region predetermined the existence of three types of hydrogeologic structures: rift depressions — hydrogeologic basins; rift “shoulders” — hydrogeologic massifs; and rift dislocations — flooded faults differing greatly in the formation conditions of groundwaters. The largest water accumulations occur within basins and flooded faults: Cold groundwaters of atmospheric nature are localized in crush zones of subsurface faults, and warm fracture-vein waters of specific microcomponent and gas compositions, in deep faults. The mantle genesis of some microcomponents casts no doubt owing to their mantle markers, whereas the participation of an endogenous source in the formation of waters carrying these components calls for additional study.

Applying the method of thermodynamic-potential minimization, we have qualitatively estimated the process of transformation of mantle hydrocarbon fluids under the *PT*-conditions of rift systems. Based on the modeling results obtained, we have justified the existence of an H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> branch of the Earth’s mantle degassing in rift structures and have established the conditions of generation of fresh juvenile waters from ascending initially dry mantle hydrocarbon fluids.

*Rift structures, structure-hydrogeological analysis, hydrocarbon fluid, physicochemical modeling*

Приуроченность пресной подземной гидросферы к континентальным рифтовым структурам хорошо объясняется с позиций структурно-гидрогеологического анализа [1]. Однако причины гидрохимической инверсии профиля подземных вод, как и физико-химическая природа их распределения в условиях континентальных рифтов, пока не достаточно ясны. Одним из возможных путей раскрытия этих закономерностей является их интерпретация на основе современных положений флюидной геодинамики [2].

Развитие представлений о глубинных флюидных системах связано преимущественно с исследованиями геотермического и тектонического режимов, а также с магматическими процессами, флюидная природа которых не вызывает сомнений. В настоящей работе рассматривается другой аспект проблемы, а именно — возможное участие кислородсодержащего углеводородного флюида в формировании совре-

менной гидросферы. Эти вопросы в той или иной мере затрагивались в работах [3, 4]. Основными компонентами такого флюида, как правило, считаются вода и углекислота, возникающие в процессах метаморфической дегидратации и декарбонатизации пород или в результате остывания магматических расплавов. Растворы, формирующиеся при участии этих флюидов, должны быть насыщены кремнекислотой и другими компонентами, слагающими породы, следовательно, характеризуются повышенной минерализацией.

Тем не менее большой фактический материал свидетельствует о том, что глубоким разломам в рифтовых зонах свойственны низкоминерализованные воды. Приведем некоторые наиболее убедительные свидетельства. Современным рифтовым структурам и их палеоаналогам (рифты Байкальский, Момский, рифт Западно-Сибирской плиты) характерны инверсионные гидрохимические разрезы [5—11]. В частности, это отчетливо прослеживается по глубоким скважинам в пределах Усть-Селенгинской впадины Байкальского рифта, где минерализация подземных вод может снижаться до  $0,13 \text{ г/дм}^3$  на глубине более 1750 м, а содержание водорода в газовой фазе достигать 100 % [2, 9, 10]. Кроме того, установлено, что к рифтогенным системам фундамента Западно-Сибирской плиты (Обь-Пуровская и Уренгой-Тазовская) приурочены как зоны опреснения подземной гидросферы [5, 7, 8, 11], так и располагающиеся в осадочном чехле крупнейшие газовые месторождения. Современные гидротермы рифтов (Исландия, Байкальский рифт, Восточно-Африканская рифтовая система, рифтовая зона Фэнвэй и др.), в отличие от гидротерм зон субдукции, также пресноводны [2, 9, 12, 13]. Не согласован и солевой баланс вод оз. Байкал. Величина минерализации воды озера ( $0,096 \text{ г/дм}^3$ ) ниже средней минерализации впадающих в него рек ( $0,117 \text{ г/дм}^3$ ). Вышеизложенные факты, как и значения изотопного соотношения гелия ( $\sim 9 \cdot 10^{-6}$ ), не укладываются в схему образования пресной гидросферы под влиянием растворов, формирующихся в земной коре. Следовательно, необходимо рассмотреть альтернативные источники опреснения.

Из недр Земли во всем геологическом временном интервале ее формирования происходит прерывно-непрерывное выделение флюидной компоненты. Этот процесс играет огромную роль в преобразовании планеты в целом и объединяется таким понятием, как глобальная дегазация Земли. На основе закономерностей эндогенной активности Земли от архея до кайнозоя в этом процессе выделяются две ветви [2]. 1. **Монотонно угасающая общепланетарная дегазация**, характерной чертой которой является постепенная локализация „очагов“ дегазации от площадных в архее, ареальных в протерозое до линейных в фанерозое и дискретных в кайнозое. 2. **Импульсная интенсивная дегазация мантии**, интерпретируемая как плюмы, представленные преимущественно восстановленными газами. Анализ продуктов преобразования пород литосферы под воздействием плюмов позволяет выделить принципиально отличные типы флюидных систем: водородно-углеродные и водородно-сернистые. На базе водородно-углеродных формируются карбонатиты и скопления углеводородов. Водородно-сернистые служат основой формирования скоплений сульфидов и сернисто-сероводородных систем. Наиболее важным следствием этих теоретических построений служит вывод о том, что процесс „старения“ Земли необратим, каждому ее новому состоянию отвечает свой режим дегазации. Преобладание той или иной ветви дегазации на общепланетарном уровне отражает различные ступени самоорганизации Земли в целом, а для отдельных ее структур — уровни зрелости литосферы. Это позволяет обоснованно считать, что именно глубокие рифтогенные разломы в настоящее время служат флюидовыводящими каналами углеводородной ветви. С другой стороны, рифтогенный геодинамический режим предопределяет формирование специфических гидрогеологических условий. Применительно к основным геоструктурным элементам здесь отчетливо выделяются три типа гидрогеологических структур, контрастно различающихся по условиям распределения и формирования подземных вод: рифтовые впадины — гидрогеологические бассейны; „плечи“ рифта (горное обрамление) — гидрогеологические массивы; рифтогенные разрывные тектонические нарушения — обводненные разломы [1]. Анализ распределения подземных вод в гидрогеологических структурах региона свидетельствует о том, что их наиболее крупные скопления формируются в пределах бассейнов и обводненных разломов, причем в зонах дробления приповерхностных разломов локализуются, как правило, холодные подземные воды атмосферного генезиса, а пресные трещинно-жильные воды глубоких разломов обладают повышенной температурой и специфическим микрокомпонентным и газовым составом (см. таблицу).

Охарактеризованные в таблице структурно-гидрогеологические условия, а также гидрогеохимические данные [5—12] определенно свидетельствуют об участии эндогенных флюидов в формировании современной гидросферы рифтовых структур. Однако, если глубинное происхождение ряда микрокомпонентов подземных вод благодаря мантийному гелию не вызывает сомнения, то участие эндогенного источника в формировании самого растворителя требует привлечения дополнительных данных. Поэтому очень важно еще раз подчеркнуть те факты, на которых основываются наши построения. В первую очередь, это равновесное существование тяжелых кислородсодержащих углеводородов (ТКУ) в верхней мантии [14] (потенциальный возобновляемый источник пресной воды); во-вторых, — глубинная дегазация Земли, сыгравшая ведущую роль в формировании ее верхних оболочек (структурно-локализо-

**Характеристика гидрогеологических структур Байкальской рифтовой зоны**

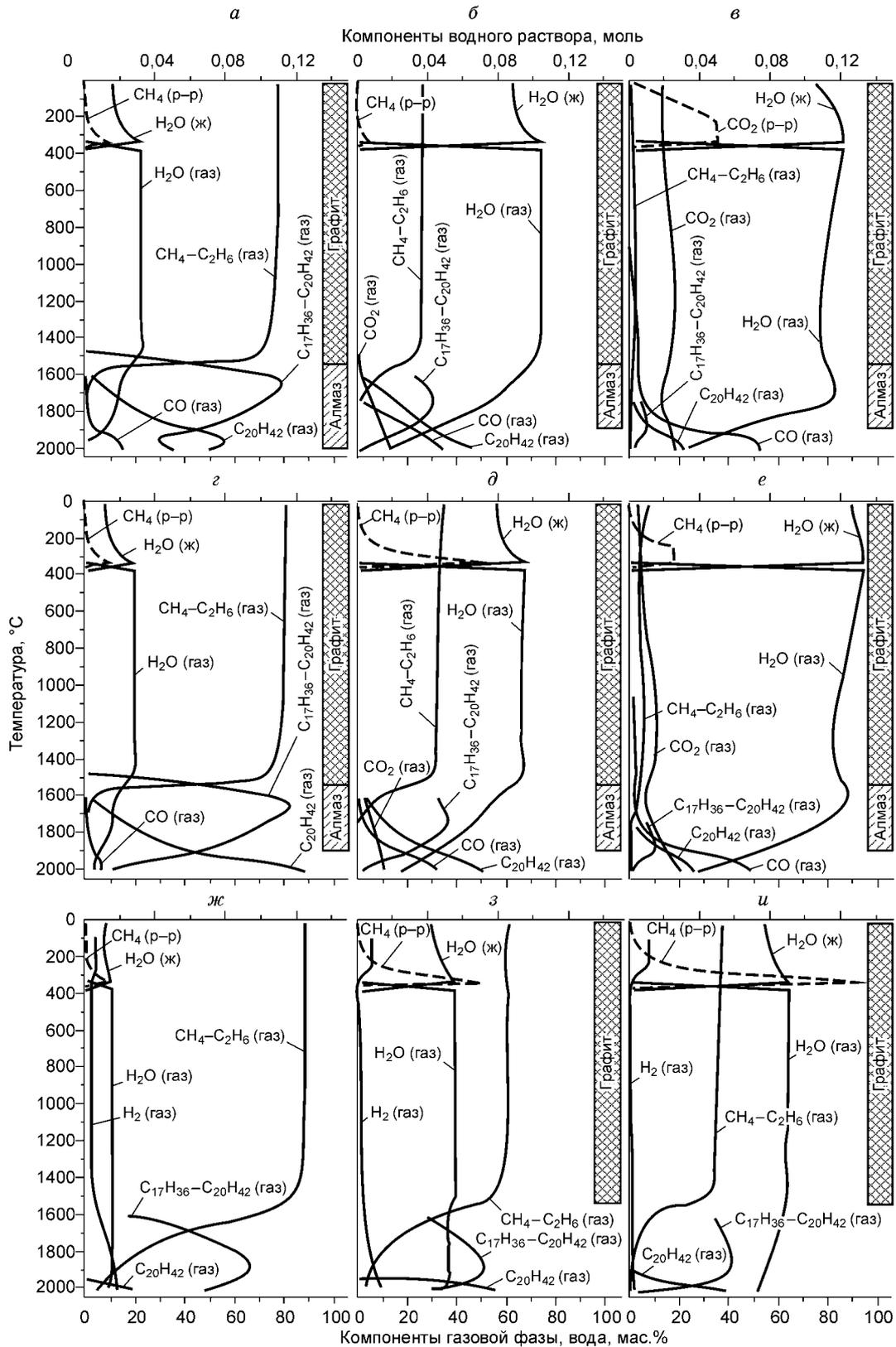
Структура	Подземные воды						
	Основные типы	Установившийся уровень, м	Удельные дебиты скважин, л/с	$T, ^\circ\text{C}$	Минерализация, г/дм <sup>3</sup>	Преобладающие ионы	Специфические компоненты
Гидрогеологические массивы	Трещинно-грунтовые	4,6—40	0,001—0,1	2—5	0,02—0,3	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Na}^+$	—
Гидрогеологические бассейны	Порово-пластовые	20—(+20*)	0,01—5,6	3—63	0,2—0,4	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$	$\text{CH}_4$ , $\text{H}_2\text{S}$
Обводненные разломы:	Трещинно-жильные	37—(+5*)	0,8—7,8	1—5	0,04—0,5	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$	Fe, Rn
приповерхностные							
глубокие		до +5*	0,1—5,0	18—84	0,22—0,7, реже >1	$\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Na}^+$	$\text{N}_2$ , $\text{CO}_2$ , He, F, $\text{H}_2$ , $\text{SiO}_3$ , $\text{CH}_4$

\* Напор над поверхностью Земли.

ванный механизм подъема глубинного вещества, действующий в масштабах геологического времени); в третьих, — наличие разрывных рифтовых структур, выводящих глубинные флюиды (реальная геологическая конструкция, создающая благоприятные условия для проведения, преобразования и аккумуляции флюида или продуктов его преобразования). Существование глубинного источника пресных вод хорошо согласуется с реально установленным тепломассопотоком в рифтовых структурах [4].

Чтобы ответить на вопрос о возможности образования эндогенных вод, нами с помощью разработанного И.К. Карповым метода минимизации термодинамических потенциалов [15] сделана качественная оценка процесса преобразования ТКУ в геобаротермических условиях рифтовых систем. Физико-химическая модель подъема эндогенного флюида включает водный раствор, газовую фазу (10 и 128 компонентов соответственно), графит и алмаз. Всего 140 зависимых компонентов. Необходимая термодинамическая информация взята из баз термодинамических данных, встроенных в программный комплекс Селектор-*W* [15]. Принята следующая схема расчетов. С учетом последних геохимических и экспериментальных данных о мантийном флюиде [14] задано три состава: преимущественно углеродный ( $\text{H/C} = 1,8$ ), отвечающий составу тяжелой дегазированной нефти; углеводородный ( $\text{H/C} = 2,1$ ), соответствующий составу газовой-жидких включений в мантийных породах и минералах; и преимущественно метановый ( $\text{H/C} = 4,5$ ), отвечающий составу метановодородных флюидных потоков. Преобразование каждого из составов изучалось в зависимости от следующих величин  $\text{C/O} = 1:0,1, 1:0,5, 1:1$ ;  $PT$ -условия термодинамического равновесия соответствовали значениям геобаротерм, представленным в работе [14]. Процесс подъема флюида моделировался в две стадии: первая — расчет термодинамического равновесия в системе флюид—конденсированные фазы в условиях температур выше  $375^\circ\text{C}$ ; вторая — расчет равновесия в системе водный раствор—газ—конденсированные фазы в интервале температур  $25—375^\circ\text{C}$ . Выделение стадий — прием, позволяющий исследовать поведение  $\text{H}_2\text{O}$  как в тех условиях, когда возможно существование одновременно воды, газов и конденсированных фаз, так и тогда, когда существуют только флюид и твердые фазы.

Результаты моделирования приводят к выводу о том, что равновесно существующие в верхней мантии тяжелые, в том числе и кислородсодержащие, углеводороды ( $\text{C}_{17}—\text{C}_{20}$ ) в процессе восхождения по глубинным рифтогенным флюидоканалам преобразуются во флюид, состоящий из  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , а затем, когда температура снижается (стадия 2) — в водный раствор, насыщенный углекислотой и метаном. На рисунке изображен равновесный состав системы  $\text{C—H—O}$  в координатах  $PT$ -условия (глубина) — содержание компонентов. Из диаграммы следует, что независимо от количества кислорода во флюиде, вода равновесна только с легкими углеводородами. Даже обедненный кислородом глубинный флюид (см. рисунок, *a, z, ж*), содержащий в нижних точках геобаротермы эйкозанол ( $\text{C}_{20}\text{H}_{42}\text{O}$ ) и  $\text{CO}$ , в условиях температур меньше  $1500^\circ\text{C}$  преобразуется в метан и  $\text{H}_2\text{O}$ . Увеличение содержания кислорода приводит к образованию  $\text{CO}_2$  и росту концентрации  $\text{CO}$  в области устойчивого существования ТКУ, а в зоне существования легких углеводородов возрастает количество  $\text{H}_2\text{O}$  (см. рисунок, *б, в, д, е*). В двухфазной области диаграммы, т. е. там, где стабильны флюид и твердый углерод, количество двуокиси углерода определяется величиной  $\text{H/O}$ . В том случае, когда во флюиде равновесно существует свободный водород, то  $\text{CO}_2$  находится либо в следовых количествах, либо отсутствует полностью (см. рисунок, *ж—и*). В условиях близких к земной поверхности в равновесии сосуществуют три фазы: водный раствор, газ и графит. Дивергенция глубинного флюида на газ и водный раствор приводит к изменению состава газов. Относительное количество метана в газовой фазе возрастает до 90 %, основным компонентом водного раствора



**Образование ювенильных вод из мантийного флюида в зависимости от исходного химического состава:**

*a–в* —  $N/C = 1,8$ ; *г–е* —  $N/C = 2,1$ ; *ж–и* —  $N/C = 4,5$ . Содержание кислорода: *a, ж* — 0,1 моль; *б, д, з* — 0,5 моль; *в, е, и* — 1 моль.

является метан, и только в тех решениях, где  $C/O > 0,5$ , а  $C/H < 2$ , в растворе возможно присутствие  $CO_2$  в сопоставимых с содержанием метана количествах (см. рисунок, в).

Результаты моделирования показывают, что термодинамика не запрещает процесс образования воды из исходно сухого углеводородного мантийного флюида. Теоретически предсказанный и гидрогеохимически фиксируемый процесс генерации эндогенных вод возможен только в условиях рифтогенной геодинамической обстановки, обеспечивающей благоприятное положение глубинного источника флюида, существование высокопроницаемых разломных зон земной коры и восходящих флюидных потоков. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-05-97302; 03-05-65188).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Диденков Ю.Н.** Формирование гидросферы Байкальского региона в связи с процессами рифтогенеза // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Вып. 22. Иркутск, ИрГТУ, 1998, с. 68—77.
2. **Летников Ф.А.** Дегазация Земли как глобальный процесс самоорганизации // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. М., ГЕОС, 2002, с. 6—7.
3. **Киссин И.Г.** Основные типы флюидных систем консолидированной коры и их связь с тектоническими структурами // Докл. РАН, 2004, т. 395, № 3, с. 381—386.
4. **Поляк Б.Г.** Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М., Наука, 1988, 192 с.
5. **Лагунова И.А.** Условия проявления и особенности формирования вод пониженной минерализации в глубоких зонах осадочных бассейнов // Сов. геология, 1979, № 2, с. 48—62.
6. **Безроднов В.Д.** О происхождении инверсионной гидрохимической зональности в областях интенсивных тектонических движений // Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 4, с. 915—918.
7. **Ежов Ю.А.** Закономерности распространения химической инверсии в подземной гидросфере // Сов. геология, 1981, № 1, с. 106—112.
8. **Розин А.А.** Подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна и их формирование. Новосибирск, Наука, 1977, 100 с.
9. **Мартынова М.А., Грачев А.Ф.** Современные представления об эволюции состава гидросферы // Проблемы гидрогеохимии и промышленные рассолы. Минск, Наука и техника, 1983, с. 16—22.
10. **Гидрогеология Прибайкалья** / Ред. Е.В. Пиннекер. М., Наука, 1968, 169 с.
11. **Афанасьев Ю.Т.** Система рифтов Западной Сибири. М., Наука, 1977, 101 с.
12. **Кононов В.И.** Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М., Наука, 1983, 216 с.
13. **Бычинский В.А., Ломоносов И.С., Диденков Ю.Н.** Определяющие отличия физико-химических систем „вода—порода“ рифтовых и островодужных структур // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири. Томск, Изд-во ТПУ, 2003, с. 49—52.
14. **Зубков В.С.** К вопросу о составе и формах нахождения флюида системы C—H—N—O—S в PT-условиях верхней мантии // Геохимия, 2001, т. 39, № 2, с. 131—145.
15. **Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A., Bychinskii V.A.** The convex programming minimization of five thermodynamic potentials other than Gibbs energy in geochemical modeling // Amer. J. Sci., 2002, v. 302, № 4, p. 281—311.

Рекомендована к печати 30 августа 2005 г.  
Г.Н. Аношиным

Поступила в редакцию  
27 июля 2005 г.